

## ปัจจัยของนาโนซิลิกาและนาโนอะลูมินาเป็นสารผสมเพิ่ม ต่อสมบัติของไฮบริดซีเมนต์

### Factors of Nano-SiO<sub>2</sub> and Nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> as an Additive on Properties of Hybrid Cements

ธนกร ภูเงินข้า<sup>1\*</sup> สกลวรรณ ห่านจิตสุวรรณ<sup>2</sup> เสริมศักดิ์ สุขเกษม<sup>1</sup> เชิดศักดิ์ สุขศิริพัฒน์พงศ์<sup>1</sup>  
จิระยุทธ สืบสุข<sup>1</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จังหวัดนครราชสีมา 30000

<sup>2</sup>สาขาวิชาเทคโนโลยีโยธา คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี จังหวัดลำปาง 52100

\*Corresponding Author: E-mail: tanakorn.ph@rmuti.ac.th

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการใช้นาโนซิลิกาและนาโนอะลูมินาเป็นสารผสมเพิ่มต่อคุณสมบัติทางกายภาพและโครงสร้างทางจุลภาคของไฮบริดซีเมนต์ ไฮบริดซีเมนต์ผลิตจากเถ้าลอยและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่อัตราส่วนร้อยละ 90 ต่อ 10 นาโนซิลิกาและนาโนอะลูมินาถูกใช้เป็นสารผสมเพิ่มร้อยละ 0, 1, 2, และ 3 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน เพื่อใช้เป็นส่วนผสมสำหรับผลิตไฮบริดซีเมนต์ สารละลายที่ใช้ในส่วนผสมคือ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 10 โมลาร์ และสารละลายโซเดียมซิลิเกต โดยการใช้อัตราส่วนของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 0.60 และบ่มที่อุณหภูมิปกติทุกอัตราส่วนผสม ผลการทดสอบ แสดงให้เห็นว่าการใช้นาโนซิลิกาเป็นสารผสมเพิ่มในไฮบริดซีเมนต์ส่งผลให้ระยะเวลาการก่อตัวลดลง โดยระยะเวลาการก่อตัวของไฮบริดซีเมนต์ระหว่างการใช้นาโนอะลูมินากับนาโนซิลิกาให้ผลไม่แตกต่างกัน การใช้ทั้งนาโนซิลิกาและนาโนอะลูมินาเป็นสารผสมเพิ่มสามารถเพิ่มคุณสมบัติด้านกำลังอัด กำลังดัด และกำลังเหนียวของไฮบริดซีเมนต์ โดยการใช้นาโนซิลิกาและนาโนอะลูมินาเป็นสารผสมเพิ่มร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก เป็นสัดส่วนที่เหมาะสมต่อกำลังอัด กำลังดัด และกำลังเหนียวของไฮบริดซีเมนต์ ซึ่งที่อัตราส่วนนี้โครงสร้างทางจุลภาคมีความเป็นเนื้อเดียวกันและการแน่นของเฟส

**คำสำคัญ:** ไฮบริดซีเมนต์ นาโนซิลิกา นาโนอะลูมินา สมบัติเชิงกล โครงสร้างทางจุลภาค

#### ABSTRACT

This research investigates the use of nano-SiO<sub>2</sub> and nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> as an additive on the mechanical and microstructure properties of hybrid cements. Hybrid cements are manufactured from FA and PC with FA:PC ratio at 90:10. Nano-SiO<sub>2</sub> and nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> are used as an additive at the dosages of 0%, 1%, 2%, and 3% by weight of binder for making hybrid cements. The alkali solutions are 10M sodium hydroxide (NaOH) and sodium silicate (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) solutions. Constants alkaline liquid/binder ratio of 0.60 and curing at ambient temperature are used in all mixtures. Test results show that the use of nano-SiO<sub>2</sub> as an additive in hybrid cements results in decreasing of setting time. While the comparison between nano-SiO<sub>2</sub> and nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, the setting time of hybrid

cements is not significantly different. The use of both nano-SiO<sub>2</sub> and nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> as an additive can enhance the compressive, flexural and slant shear strengths of hybrid cements. The use of 2% nano-SiO<sub>2</sub> and 2% nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> is the optimum level for compressive, flexural and slant shear strengths development of hybrid cements paste, which making a homogenous and dense matrix.

**Keyword:** Hybrid cements, nano-SiO<sub>2</sub>, nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Mechanical properties, Microstructure

## 1. บทนำ

ในการก่อสร้างองค์อาคารทั่วไปจะใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุเชื่อมประสานหลัก อย่างไรก็ตามในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ก่อให้เกิดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณมาก ซึ่งก่อให้เกิดผลกระทบต่อสภาพแวดล้อม [1] การใช้เถ้าลอย และเถ้าจากภาคเกษตรกรรมจัดเป็นวัสดุปอชโลนิคที่สามารถนำมาใช้ได้ในงานก่อสร้างเพื่อลดการใช้ปูนซีเมนต์ให้น้อยลง ขณะเดียวกันงานวิจัยในปัจจุบันก็ได้มีความพยายามที่ศึกษาวัสดุที่สามารถนำมาใช้แทนการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ให้ได้มากที่สุด ซึ่งไฮบริดซีเมนต์เป็นวัสดุเชื่อมประสานที่กำลังได้รับความนิยมเพื่อพัฒนาใช้ในงานก่อสร้าง

ไฮบริดซีเมนต์เป็นชนิดหนึ่งของวัสดุอัลคาไลน์ (Alkali-activated binders) ซึ่งไฮบริดซีเมนต์สามารถสังเคราะห์ได้จากปูนซีเมนต์ผสมกับวัสดุที่ส่วนประกอบของซิลิกาเป็นหลักและกระตุ้นด้วยสารละลายต่าง [2] ในประเทศไทยมีการนำเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะมาใช้เป็นวัสดุตั้งต้นในการผลิตเป็นไฮบริดซีเมนต์จากงานวิจัยของ Chindaprasirt et. al. [3] พบว่าสามารถนำเถ้าลอยมาใช้เป็นวัสดุตั้งต้นในการเตรียมเป็นวัสดุอัลคาไลน์ได้ดี อย่างไรก็ตามการเตรียมไฮบริดซีเมนต์จากเถ้าลอยเมื่อเตรียมในอุณหภูมิปกติจะให้ได้กำลังรับแรงอัดไม่มาก การใช้ความร้อนประมาณ 40-75 องศาเซลเซียส ในการบ่มไฮบริดซีเมนต์จะทำให้ได้กำลังรับแรงอัดที่ดีขึ้น [3] นอกจากนี้มีงานวิจัยของ Pangdaeng และคณะ [4] ได้พยายามปรับปรุงสมบัติกำลังรับแรงอัดของไฮบริดซีเมนต์โดยการใช้ปูนซีเมนต์เป็นสารผสมเพิ่ม และพบว่าปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์เป็นปฏิกิริยาคาย

ความร้อน ซึ่งส่งผลเชิงบวกต่อการพัฒนากำลังรับแรงอัดของไฮบริดซีเมนต์เมื่อผลิตในอุณหภูมิปกติ

นอกจากนี้มีการศึกษาความเป็นไปได้ถึงการนำวัสดุที่มีอนุภาคขนาดเล็กระดับนาโนเมตรมาใช้ประโยชน์เพื่อเพิ่มสมบัติให้กับวัสดุก่อสร้าง เช่น นาโนซิลิกาและนาโนอะลูมินา เป็นต้น เนื่องด้วยนาโนซิลิกาและนาโนอะลูมินาเป็นวัสดุที่มีความเป็นปอชโซลานสูงและมีส่วนประกอบของออกซิเจนในปริมาณมาก และมีพื้นที่ผิวปริมาณมาก [5] ดังนั้นจุดประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือ ศึกษาปริมาณนาโนซิลิกาและนาโนอะลูมินาที่เหมาะสมต่อสมบัติของไฮบริดซีเมนต์ที่ผลิตจากเถ้าลอย-ปูนซีเมนต์ ซึ่งผลการทดสอบที่ได้รับช่วยให้เข้าใจถึงพฤติกรรมของไฮบริดซีเมนต์และเป็นทางแนวทางเบื้องต้นในการพัฒนาไฮบริดซีเมนต์เพื่อใช้เป็นวัสดุพิเศษในอนาคตเพื่อเป็นอีกหนึ่งทางเลือกในอุตสาหกรรมก่อสร้างต่อไป อีกทั้งยังเป็นการนำวัสดุพลอยได้จากภาคอุตสาหกรรมมาใช้ประโยชน์ให้เกิดประโยชน์สูงสุด

## 2. วิธีการทดสอบ

### 2.1 วัสดุ

วัสดุที่ใช้ในการศึกษา คือ เถ้าลอย (FA) จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 (PC) นาโนซิลิกา (Si) และนาโนอะลูมินา (Al) สารละลายอัลคาไลน์ที่ใช้ประกอบด้วย สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10 โมลาร์ สารละลายโซเดียมซิลิเกตประกอบด้วยโซเดียมออกไซด์ร้อยละ 13.89 ซิลิการ้อยละ 32.15 และน้ำร้อยละ 53.96 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของ FA และ PC

Chemical compositions	FA (%)	PC (%)
SiO <sub>2</sub>	29.32	20.80
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.96	4.70
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.64	3.40
CaO	25.79	65.30
MgO	2.94	1.50
Na <sub>2</sub> O	2.94	0.40
K <sub>2</sub> O	2.93	0.10
SO <sub>3</sub>	7.29	2.70
LOI	0.30	0.90

ตารางที่ 2 สมบัติทางกายภาพของ FA และ PC

Physicals/Materials	FA	PC
Specific gravity	2.69	3.16
Median Particle Size, $d_{50}$ ( $\mu\text{m}$ )	15.3	14.6
Blaine fineness ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )	4300	3600

ตารางที่ 3 สมบัติของนาโนซิลิกาและนาโนอะลูมินา

Physicals/Materials	nano-SiO <sub>2</sub>	nano-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Average particle size (nm)	12	13
Specific surface area, BET ( $\text{m}^2/\text{g}$ )	200	100
Purity (%)	>99.98	>99.38
Appearance	White powder	

องค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางกายภาพของเถ้าลอยและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แสดงดังตารางที่ 1 และ 2 เถ้าลอยประกอบด้วยซิลิการ้อยละ 29.32 อะลูมินาร้อยละ 12.96 เหล็กออกไซด์ร้อยละ 15.64 และแคลเซียมออกไซด์ร้อยละ 25.79 เถ้าลอยที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้จัดเป็นเถ้าลอยประเภท C ตามมาตรฐาน ASTM C618-15 [6] เนื่องจากมีผลรวมของซิลิกาอะลูมินา และเหล็กออกไซด์ร้อยละ 57.92 และมีแคลเซียมออกไซด์ในองค์ประกอบร้อยละ 25.79 แต่อย่างไรก็ตามปริมาณของซัลเฟอร์เท่ากับร้อยละ 7.29 ซึ่งตามมาตรฐาน ASTM C618-15 [6] กำหนดให้ไม่เกินร้อยละ 5.0 แสดงให้เห็นว่าเถ้าลอยที่ใช้ในงานวิจัยนี้ยังไม่ผ่านเกณฑ์ตามมาตรฐาน ASTM C618-15 ทั้งหมด และเมื่อจำแนกตาม มอก.2135-2545 [7] พบว่า เถ้าลอย

ที่ใช้ในงานวิจัยไม่ผ่านข้อกำหนดของ มอก.2135-2545 แต่อย่างไรก็ตามมีความใกล้เคียงกับชั้นคุณภาพที่ 1

ค่าความถ่วงจำเพาะ ความละเอียดของเบลน และขนาดอนุภาคเฉลี่ยของเถ้าลอยเท่ากับ 2.69, 4300 ตร.ซม./กรัม และ 15.3 ไมโครเมตร ตามลำดับ สำหรับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.16 ความละเอียดของเบลนเท่ากับ 3,600 ตร.ซม./กรัม และขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 14.6 ไมโครเมตร ส่วนอนุภาคนาโนซิลิกาและนาโนอะลูมินามีค่าเท่ากับ 12 และ 13 นาโนเมตร มีพื้นที่ผิวเท่ากับ 200,000 และ 100,000 ตร.ซม./กรัม ตามลำดับ สมบัติของอนุภาคนาโนซิลิกาและนาโนอะลูมินา ดังแสดงในตารางที่ 3

## 2.2 ส่วนผสมและรายละเอียดการผสมไฮบริด

### ซีเมนต์

ส่วนผสมของไฮบริดซีเมนต์ ดังแสดงในตารางที่ 4 อัตราส่วนสารละลายอัลคาไลน์ต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.60 อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 2.0 (สารละลายโซเดียมซิลิเกตร้อยละ 40 และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก) ไฮบริดซีเมนต์เพสต์ใช้ส่วนผสมของเถ้าลอยร้อยละ 90 และปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก และมีการศึกษาการใช้นาโนซิลิกาและนาโนอะลูมินาเป็นสารผสมเพิ่มร้อยละ 0, 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนักตามลำดับ ในส่วนผสมของไฮบริดซีเมนต์

ตารางที่ 4 ส่วนผสมของเพสต์ไฮบริดซีเมนต์ (กรัม)

Mix symbol	FA (g)	PC (g)	SiO <sub>2</sub> (g)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (g)
90FA:10PC	90	10	-	-
90FA:10PC:1Si	90	10	1	-
90FA:10PC:2Si	90	10	2	-
90FA:10PC:3Si	90	10	3	-
90FA:10PC:1Al	90	10	-	1
90FA:10PC:2Al	90	10	-	2
90FA:10PC:3Al	90	10	-	3

## 2.3 การทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของไฮบริดซีเมนต์

การก่อตัวของไฮบริดซีเมนต์ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C191-13 [8]

#### 2.4 กำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัดของไฮบริดซีเมนต์

หลังจากการผสมไฮบริดซีเมนต์แล้วเสร็จทำการเทวัสดุผสมลงในแบบหล่อขนาด 50x50x50 มิลลิเมตร เพื่อเตรียมทดสอบกำลังรับแรงอัดของไฮบริดซีเมนต์ โดยประยุกต์จากมาตรฐาน ASTM C109 [9] สำหรับกำลังรับแรงดัดของไฮบริดซีเมนต์จะทดสอบจาก modulus of rupture โดยใช้แบบหล่อปริซึมขนาด 40x40x160 มิลลิเมตร โดยประยุกต์จากมาตรฐาน ASTM C293 [10] ตัวอย่างของไฮบริดซีเมนต์จะถูกแกะออกจากแบบหล่อเมื่ออายุครบ 1 วัน และห่อด้วยฟิล์มพลาสติกเพื่อป้องกันความชื้นและเก็บรักษาตัวอย่างไว้ในห้องควบคุมอุณหภูมิ การทดสอบกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัดของไฮบริดซีเมนต์จะทดสอบที่ตัวอย่างอายุ 28 วัน ผลการทดสอบที่ได้จะเป็นค่าเฉลี่ยของ 3 ก่อนตัวอย่างในแต่ละส่วนผสม

#### 2.5 การทดสอบลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคด้วยเทคนิค SEM ของไฮบริดซีเมนต์

เลือกชิ้นส่วนของไฮบริดซีเมนต์ที่ผ่านการทดสอบกำลังรับแรงอัดมาทดสอบลักษณะโครงสร้างทางจุลภาค ชิ้นส่วนของวัสดุถูกวางบนที่วางตัวอย่างและเคลือบทอง ทำการทดสอบที่ 15 กิโลโวลต์ที่กำลังขยาย 3,000 เท่า

#### 2.6 การทดสอบทดสอบองค์ประกอบทางแร่ด้วยเทคนิค XRD ของไฮบริดซีเมนต์

การเตรียมตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ของไฮบริดซีเมนต์ที่อายุการบ่มเท่ากับ 28 วัน โดยบดตัวอย่างไฮบริดซีเมนต์ให้เป็นผงละเอียด และนำไปทดสอบด้วยเครื่อง X-Ray diffraction (XRD) โดยทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ของไฮบริดซีเมนต์ตั้งแต่มุม 5 ถึง 60 องศา

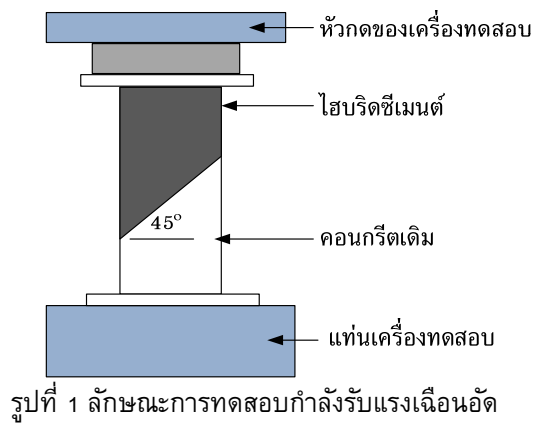
#### 2.7 การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนอัดระหว่างคอนกรีตเดิมกับไฮบริดซีเมนต์

คอนกรีตออกแบบตามมาตรฐาน ACI 211.1-97 [11] วัสดุที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างคอนกรีตประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1

มวลรวมละเอียด และมวลรวมหยาบขนาด 3/8 นิ้ว ซึ่งการเลือกใช้มวลรวมหยาบขนาด 3/8 นิ้ว เนื่องด้วยต้องการควบคุมขนาดมวลรวมใหญ่สุดต้องไม่เกิน 1/5 เท่าของขนาดที่แคบที่สุดของแบบหล่อ โดยคอนกรีตที่ใช้มีกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดัดเท่ากับ 36.0 และ 8.6 เมกะปาสกาล

การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนอัดระหว่างคอนกรีตเดิมกับไฮบริดซีเมนต์ประยุกต์จากมาตรฐาน FM3-C882 [12] ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนอัดเริ่มต้นด้วยเทคอนกรีตที่ถูกออกแบบไว้ลงในแบบหล่อรูปปริซึมขนาด 50x50x125 มิลลิเมตร ทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นทำการถอดแบบและบ่มในน้ำเป็นเวลา 28 วัน หลังจากครบอายุบ่มตัวอย่างคอนกรีตถูกห่อด้วยแผ่นพลาสติกเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นเป็นเวลา 60 วัน รวมเวลาในการบ่มตัวอย่างคอนกรีตเท่ากับ 90 วัน เพื่อต้องการให้คอนกรีตมีการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันสมบูรณ์ [13] และกลายเป็นคอนกรีตเดิม

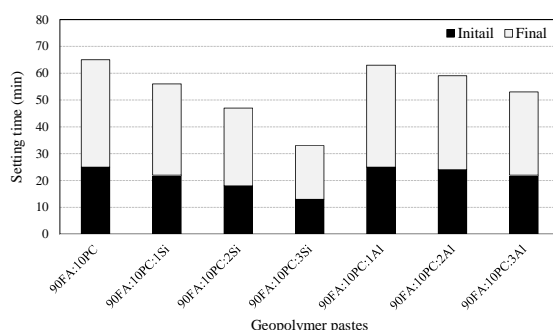
หลังจากการเตรียมตัวอย่างคอนกรีตเรียบร้อยแล้ว ตัวอย่างคอนกรีตเดิมถูกตัดแบ่งเป็น 2 ส่วนเท่าๆ กัน โดยทำมุม 45 องศากับแนวตั้ง ตามมาตรฐาน FM3-C882 [12] สำหรับการเลือกมาตรฐาน FM3-C882 ที่แนะนำให้ตัดมุมของตัวอย่างเท่ากับ 45 องศา เนื่องด้วยผู้วิจัยต้องการศึกษาลักษณะการวิบัติของตัวอย่างคอนกรีตกับวัสดุซ่อมแซมเพิ่มเติมเพื่อพิจารณาถึงลักษณะการยึดเกาะกันระหว่างคอนกรีตกับวัสดุซ่อมแซมเพื่อประกอบผลการทดสอบ ดังได้มีการรายงานไว้ในงานวิจัยที่ผ่านมา [14] การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบค่ากำลังรับแรงเฉือนอัดระหว่างคอนกรีตกับวัสดุซ่อมแซมดำเนินตามงานวิจัยที่ผ่านมา [14-16] ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยทดสอบเมื่อไฮบริดซีเมนต์มีอายุการบ่มเท่ากับ 28 วัน และผลการทดสอบใช้ค่าเฉลี่ยจากการทดสอบ 3 ตัวอย่าง



### 3. ผลการทดสอบ

#### 3.1 ระยะเวลาการก่อตัวของไฮบริดซีเมนต์

ระยะเวลาการก่อตัวของไฮบริดซีเมนต์จากเถ้าลอยและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มีการใช้นาโนซิลิกาและนาโนอะลูมินาเป็นสารผสมเพิ่ม ดังแสดงในรูปที่ 2 พบว่าระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและระยะการก่อตัวปลายของไฮบริดซีเมนต์ที่มีการใช้นาโนซิลิกาเป็นสารผสมเพิ่มที่มีอัตราส่วน 90:10:0, 90:10:1, 90:10:2 และ 90:10:3 มีค่าระยะเวลาการก่อตัวต้นเท่ากับ 25, 22, 18, 13 นาที และค่าระยะเวลาการก่อตัวปลายเท่ากับ 40, 34, 29, 20 นาที ตามลำดับ ขณะที่ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและระยะการก่อตัวปลายของไฮบริดซีเมนต์ที่มีการใช้นาโนอะลูมินาเป็นสารผสมเพิ่มที่มีอัตราส่วน 90:10:1, 90:10:2 และ 90:10:3 มีค่าระยะเวลาการก่อตัวต้นเท่ากับ 25, 24, 22 นาที และค่าระยะเวลาการก่อตัวปลายเท่ากับ 38, 35, 31 นาที ตามลำดับ



รูปที่ 2 ระยะเวลาการก่อตัวของไฮบริดซีเมนต์ที่มีการใช้นาโนซิลิกาและนาโนอะลูมินาเป็นสารผสมเพิ่ม

จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าระยะเวลาการก่อตัวมีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจนเมื่อใช้นาโนซิลิกาและนาโนอะลูมินาในส่วนผสมของไฮบริดซีเมนต์จากเถ้าลอยและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เนื่องจากการทำปฏิกิริยาที่รวดเร็วของแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากเถ้าลอยกับซิลิกาจากนาโนซิลิกาและอะลูมินาจากนาโนอะลูมินา ดังที่กล่าวข้างต้นระบบไฮบริดซีเมนต์สามารถทำปฏิกิริยาและเกิดผลผลิตแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอะลูมิโน-ซิลิเกตไฮเดรต (C-A-S-H) มากขึ้น [17] โดยเฉพาะเมื่อผสมในปริมาณที่มากขึ้น (ร้อยละ 3) เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างการก่อตัวของไฮบริดซีเมนต์ที่มีการใช้นาโนซิลิกาและนาโนอะลูมินาเป็นสารผสมเพิ่ม พบว่า การก่อตัวของไฮบริดซีเมนต์ที่มีการใช้นาโนซิลิกาเป็นสารผสมเพิ่มมีแนวโน้มสั้นกว่าไฮบริดซีเมนต์ที่มีการใช้นาโนอะลูมินาเป็นสารผสมเพิ่ม เนื่องจากความสามารถในการทำปฏิกิริยาระหว่างซิลิกาและอะลูมินา [17] และปัจจัยของความละเอียดของนาโนซิลิกาที่มีมากกว่านาโนอะลูมินา ดังแสดงในตารางที่ 3 อย่างไรก็ตามจากรายงานวิจัย Chindaprasirt และคณะ [17] ได้รายงานว่าการใช้นาโนอะลูมินาในส่วนผสมของเถ้าลอย-แคลเซียมสูงจีโอโพลิเมอร์เพสต์มากกว่าร้อยละ 7 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน สามารถลดระยะเวลาการก่อตัวเช่นเดียวกันกับการใช้นาโนซิลิกา ซึ่งการก่อตัวที่รวดเร็วของไฮบริดซีเมนต์จากเถ้าลอยและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มีการใช้นาโนซิลิกาและนาโนอะลูมินาเป็นสารผสมเพิ่มสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานซ่อมแซมหรืองานอื่นๆ ที่ต้องการระยะเวลาการก่อตัวที่รวดเร็ว

#### 3.2 กำลังอัดของไฮบริดซีเมนต์

กำลังรับแรงอัดของไฮบริดซีเมนต์จากเถ้าลอยและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มีการใช้นาโนซิลิกาและนาโนอะลูมินาเป็นสารผสมเพิ่มดังแสดงในตารางที่ 5 จากผลการทดสอบ แสดงให้เห็นว่าการใช้นาโนซิลิกาและนาโนอะลูมินาเป็นสารผสมเพิ่มสามารถพัฒนาและปรับปรุงกำลังรับแรงอัดของไฮบริดซีเมนต์จากเถ้าลอยและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมที่ไม่มีการใช้สารผสมเพิ่ม ซึ่งกำลังรับแรงอัด

ของไฮบริดซีเมนต์ที่มีการใช้นาโนซิลิกาเป็นสารผสมเพิ่มที่อายุการบ่ม 28 วัน ของอัตราส่วน 90:10:0, 90:10:1, 90:10:2 และ 90:10:3 มีค่าเท่ากับ 30.2, 34.1, 34.5 และ 31.6 เมกะปาสกาล ตามลำดับ ขณะที่กำลังรับแรงอัดของไฮบริดซีเมนต์ที่มีการใช้นาโนอะลูมินาเป็นสารผสมเพิ่มที่อายุการบ่ม 28 วัน ของอัตราส่วน 90:10:1, 90:10:2 และ 90:10:3 มีค่าเท่ากับ 34.0, 36.0 และ 32.9 เมกะปาสกาล ตามลำดับ

ตารางที่ 5 กำลังอัดและกำลังดัดของไฮบริดซีเมนต์

Mix symbols	28-day strengths (MPa)	
	Compressive	Flexural
90FA:10PC	30.2	4.82
90FA:10PC:1Si	34.1	5.43
90FA:10PC:2Si	34.5	5.76
90FA:10PC:3Si	31.6	4.84
90FA:10PC:1Al	34.0	5.09
90FA:10PC:2Al	36.0	5.68
90FA:10PC:3Al	32.9	5.03

การเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดของไฮบริดซีเมนต์เนื่องจากการเพิ่มอัตราการทำปฏิกิริยาภายในระบบ และเนื่องจากแคลเซียมออกไซด์จากเถ้าลอยแคลเซียมสูงมีการทำปฏิกิริยากับซิลิกาจากนาโนซิลิกาหรืออะลูมินาจากนาโนอะลูมินาเกิดเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) แคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (C-A-S-H) และโซเดียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (NASH) มากขึ้นภายในระบบของไฮบริดซีเมนต์ ทำนองเดียวกันกับงานวิจัยของ Chindaprasit et al. [17] อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาที่การใช้นาโนซิลิกาและนาโนอะลูมินาเป็นสารผสมเพิ่มร้อยละ 3 พบว่ากำลังรับแรงอัดของไฮบริดซีเมนต์มีแนวโน้มลดลง อาจเนื่องจากการใช้นาโนซิลิกาและนาโนอะลูมินาเป็นสารผสมเพิ่มร้อยละ 3 ทำให้ส่วนผสมไม่เป็นเนื้อเดียวกันส่งผลให้กำลังอัดมีแนวโน้มลดลง ดังนั้น จากผลการสอบพบว่า การใช้นาโนซิลิกาและนาโนอะลูมินาเป็นสารผสมเพิ่มร้อยละ 2 เป็นปริมาณการใช้ที่เหมาะสมในการปรับปรุงคุณสมบัติของไฮบริดซีเมนต์จากเถ้าลอยและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เนื่องจากความเหมาะสมทั้งด้าน

การทำปฏิกิริยาและความเป็นเนื้อเดียวกันของส่วนผสม แต่อย่างไรก็ตาม ปริมาณที่เหมาะสมดังกล่าวสำหรับการใช้เถ้าลอยแคลเซียมสูงเป็นวัสดุตั้งต้นเท่านั้น สำหรับเถ้าลอยชนิดอื่นต้องดำเนินการทดสอบเพื่อยืนยันผลการทดสอบต่อไป

### 3.3 กำลังดัดของไฮบริดซีเมนต์

กำลังรับแรงดัดของไฮบริดซีเมนต์จากเถ้าลอยและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มีการใช้นาโนซิลิกาและนาโนอะลูมินาเป็นสารผสมเพิ่มดังแสดงในตารางที่ 5 จากผลการทดสอบ แสดงให้เห็นว่าการใช้นาโนซิลิกาและนาโนอะลูมินาเป็นสารผสมเพิ่มสามารถพัฒนาและปรับปรุงกำลังรับแรงดัดของไฮบริดซีเมนต์จากเถ้าลอยและปูนซีเมนต์ได้เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมที่ไม่มีการใช้สารผสมเพิ่มเช่นเดียวกันกับผลการทดสอบกำลังอัด ซึ่งกำลังรับแรงดัดของไฮบริดซีเมนต์ที่มีการใช้นาโนซิลิกาเป็นสารผสมเพิ่มที่อายุการบ่ม 28 วัน ของอัตราส่วน 90:10:0, 90:10:1, 90:10:2 และ 90:10:3 มีค่าเท่ากับ 4.82, 5.43, 5.76 และ 4.84 เมกะปาสกาล ตามลำดับ ขณะที่กำลังรับแรงดัดของไฮบริดซีเมนต์ที่มีการใช้นาโนอะลูมินาเป็นสารผสมเพิ่มที่อายุการบ่ม 28 วัน ของอัตราส่วน 90:10:1, 90:10:2 และ 90:10:3 มีค่าเท่ากับ 5.09, 5.68 และ 5.03 เมกะปาสกาล ตามลำดับ

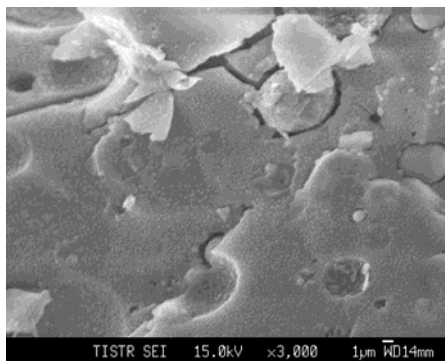
การเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงดัดของไฮบริดซีเมนต์จากเถ้าลอยและปูนซีเมนต์ อาจเนื่องจากสามารถเพิ่มอัตราการทำปฏิกิริยาของสารประกอบแคลเซียม-ซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอะลูมิโน-ซิลิเกตไฮเดรต (C-A-S-H) อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาที่การใช้นาโนซิลิกาและนาโนอะลูมินาเป็นสารผสมเพิ่มร้อยละ 3 พบว่ากำลังรับแรงดัดของไฮบริดซีเมนต์มีแนวโน้มลดลงตามเหตุผลดังที่กล่าวไว้แล้ว

### 3.4 โครงสร้างทางจุลภาคโดยกล้องจุลทรรศน์

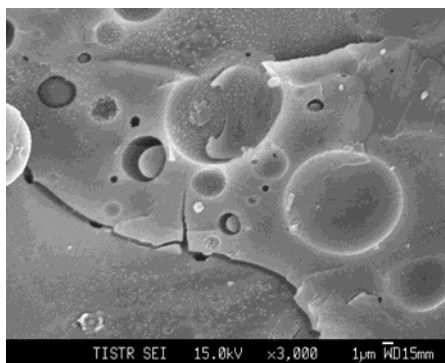
#### อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของไฮบริดซีเมนต์

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของไฮบริดซีเมนต์จากเถ้าลอยและปูนซีเมนต์ที่มีการใช้นาโนซิลิกาและนาโนอะลูมินาเป็นสารผสมเพิ่ม ดังแสดงในรูปที่ 3 พบว่า การใช้นาโนซิลิกาเป็นสารผสมเพิ่มในไฮบริดซีเมนต์ (รูปที่ 3ข) และการใช้นาโนอะลูมินาเป็น

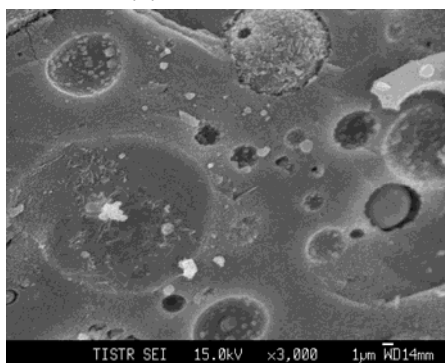
สารผสมเพิ่มในไฮบริดซีเมนต์ (รูปที่ 3ค) พบว่าโครงสร้างมีแนวโน้มทำปฏิกิริยามีมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับไฮบริดซีเมนต์เพสต์ควบคุม (รูปที่ 3ก) โดยสามารถสังเกตจากอนุภาคของเถ้าลอยที่หลงเหลือจากการทำปฏิกิริยามีขนาดเล็กลง



(ก) 90FA:10PC



(ข) 90FA:10PC:2Si



(ค) 90FA:10PC:2AI

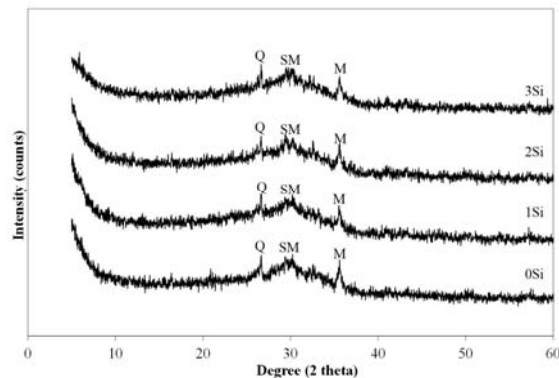
รูปที่ 3 โครงสร้างทางจุลภาคโดยกล้องจุลทรรศน์  
อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของไฮบริดซีเมนต์ที่มีการใช้  
นาโนซิลิกาและนาโนอะลูมินาเป็นสารผสมเพิ่ม

ซึ่งการใช้นาโนซิลิกาและนาโนอะลูมินาในส่วนผสมของไฮบริดซีเมนต์สามารถเพิ่มปริมาณผลผลิตให้กับระบบได้ [5] ส่งผลให้สามารถพัฒนาและปรับปรุงกำลังรับแรงอัดของไฮบริดซีเมนต์ ซึ่งผลการทดสอบของการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของไฮบริดซีเมนต์ที่มีการใช้นาโนซิลิกาและนาโนอะลูมินาเป็นสารผสมเพิ่มสอดคล้องกับผลกำลังอัดและกำลังอัดของไฮบริดซีเมนต์ ดังแสดงในตารางที่ 5

### 3.5 องค์ประกอบทางแร่ด้วยเครื่อง XRD ของไฮบริดซีเมนต์

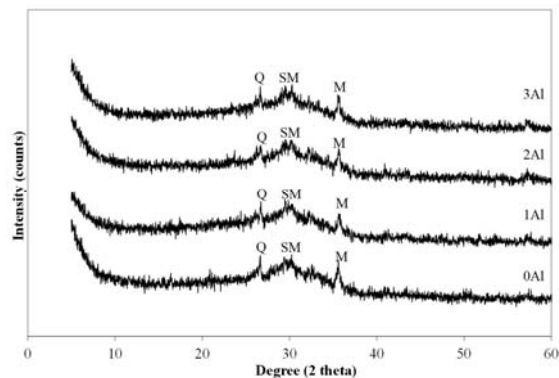
ผลวิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของไฮบริดซีเมนต์จากเถ้าลอยและปูนซีเมนต์ที่มีการใช้นาโนซิลิกาและนาโนอะลูมินาเป็นสารผสมเพิ่ม ดังแสดงในรูปที่ 4 ถึง 5 ซึ่งรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของไฮบริดซีเมนต์ที่มีการใช้นาโนซิลิกาเป็นสารผสมเพิ่ม ดังแสดงในรูปที่ 4 พบว่า มีลักษณะของความเป็นอสัณฐานมากขึ้นเล็กน้อย การใช้นาโนซิลิกาในส่วนผสมของไฮบริดซีเมนต์ แสดงให้เห็นว่า ควอตซ์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นขณะที่แมกนีซิโอเฟอร์ไรต์ไม่มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งการเพิ่มขึ้นของควอตซ์เนื่องจากการใช้นาโนซิลิกาในส่วนผสม แต่เป็นที่สังเกตได้ว่าความเป็นอสัณฐานในช่วงมุม 25-35 ถูกพบมากขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนรูปเป็นสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) แคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (C-A-S-H) มากขึ้น [5, 17] โดยสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตจะถูกพบในช่วงมุม 29.5-30.05 [18] ซึ่งการที่สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) แคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (C-A-S-H) และมีการอยู่ร่วมกันกับโซเดียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (N-A-S-H) นั้นสามารถพัฒนาและปรับปรุงกำลังรับแรงอัดของไฮบริดซีเมนต์ [19] ส่วนผลวิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของไฮบริดซีเมนต์จากเถ้าลอยและปูนซีเมนต์ที่มีการใช้นาโนอะลูมินาเป็นสารผสมเพิ่ม ดังแสดงในรูปที่ 5 พบว่ามีแนวโน้มคล้ายๆ กับแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของไฮบริดซีเมนต์จากเถ้าลอยและปูนซีเมนต์ที่มีการใช้นาโนซิลิกาเป็นสารผสมเพิ่ม ดังนั้น จากผลการทดสอบข้างต้นจะเห็นได้ว่าการใช้นาโนซิลิกาเป็นสารผสมเพิ่มส่งผลให้ควอตซ์เพิ่มขึ้นแต่การใช้นาโนอะลูมินาเป็น

สารผสมเพิ่มดูเหมือนควอตซ์ไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่อย่างไรก็ตามทั้งการใช้นาโนซิลิกาและนาโนอะลูมินาเป็นสารผสมเพิ่มช่วยเพิ่มสารประกอบแคลเซียม-ซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (C-A-S-H) ภายในระบบของไฮบริดซีเมนต์



รูปที่ 4 องค์ประกอบทางแร่ของไฮบริดซีเมนต์ที่มีการใช้นาโนซิลิกาเป็นสารผสมเพิ่ม

(Q=quartz ( $\text{SiO}_2$ ), M=magnesian ferrite ( $\text{MgFe}_2\text{O}_3$ ), S=calcium silicate hydrate (CSH))



รูปที่ 5 องค์ประกอบทางแร่ของไฮบริดซีเมนต์ที่มีการใช้นาโนอะลูมินาเป็นสารผสมเพิ่ม

(Q=quartz ( $\text{SiO}_2$ ), M=magnesian ferrite ( $\text{MgFe}_2\text{O}_3$ ), S=calcium silicate hydrate (CSH))

### 3.6 กำลังรับแรงเฉือนอัดระหว่างคอนกรีตเดิมกับไฮบริดซีเมนต์

ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนอัดระหว่างคอนกรีตเดิมกับไฮบริดซีเมนต์จากถ้ำลอยและ

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เมื่อใช้นาโนซิลิกาและนาโนอะลูมินาเป็นสารผสมเพิ่ม ดังแสดงในตารางที่ 6 ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าพบว่ากำลังรับแรงเฉือนอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างเห็นชัด แสดงถึงการยึดเกาะกันของคอนกรีตกับไฮบริดซีเมนต์ที่มีการใช้นาโนซิลิกาหรือนาโนอะลูมินาเป็นสารผสมเพิ่มที่ดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับส่วนผสมที่ไม่ได้ใช้นาโนซิลิกาและนาโนอะลูมินาเป็นสารผสม การเพิ่มขึ้นของการยึดเกาะกันระหว่างคอนกรีตเดิมกับไฮบริดซีเมนต์เนื่องจากการเพิ่มนาโนซิลิกาและนาโนอะลูมินาสามารถเพิ่มผลผลิตจากการทำปฏิกิริยา ณ บริเวณพื้นที่ของการยึดเกาะกันระหว่างคอนกรีตเดิมกับไฮบริดซีเมนต์ นอกจากนี้มีงานวิจัยที่ผ่านมา [20] ได้รายงานไว้ว่าซิลิกาและอะลูมินาจากวัสดุตั้งต้นที่ใช้ในการผลิตวัสดุอัลคาไลน์สามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ส่งผลให้สามารถปรับปรุงกำลังรับแรงเฉือนอัดระหว่างคอนกรีตกับวัสดุอัลคาไลน์ และทำให้มีความเป็นเนื้อเดียวกันสูง เมื่อพิจารณาที่การใช้นาโนซิลิกาและนาโนอะลูมินาเป็นสารผสมเพิ่มร้อยละ 3 พบว่ากำลังรับแรงเฉือนอัดระหว่างคอนกรีตกับไฮบริดซีเมนต์มีแนวโน้มลดลง ดังนั้นจากผลการทดสอบพบว่าการใช้นาโนซิลิกาและนาโนอะลูมินาเป็นสารผสมเพิ่มร้อยละ 2 โดยน้ำหนักเป็นปริมาณการใช้ที่เหมาะสมเช่นเดียวกันกับผลการทดสอบอื่นๆ

ตารางที่ 6 กำลังรับแรงเฉือนอัดระหว่างคอนกรีตเดิมกับไฮบริดซีเมนต์ที่มีการใช้นาโนซิลิกาและนาโนอะลูมินาเป็นสารผสมเพิ่ม

Mix symbols	28-day slant shear strength (MPa)
90FA:10PC	15.3
90FA:10PC:1Si	18.9
90FA:10PC:2Si	20.9
90FA:10PC:3Si	19.1
90FA:10PC:1Al	17.6
90FA:10PC:2Al	21.0
90FA:10PC:3Al	19.5



#### 4. สรุปผลการทดสอบ

4.1 การใช้นาโนซิลิกาและนาโนอะลูมินาเป็นสารผสมเพิ่มในกับไฮบริดซีเมนต์จากเถ้าลอยและปูนซีเมนต์ส่งผลให้ระยะเวลาการก่อตัวมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณการใช้นาโนซิลิกาและนาโนอะลูมินาเป็นสารผสมเพิ่ม ขณะที่ระหว่างการใช้งานนาโนซิลิกาและนาโนอะลูมินาให้ระยะเวลาการก่อตัวไม่แตกต่างกัน

4.2 การใช้นาโนซิลิกาและนาโนอะลูมินาเป็นสารผสมเพิ่มร้อยละ 1-2 โดยน้ำหนักสามารถพัฒนาสมบัติกำลังอัดและกำลังดัดของไฮบริดซีเมนต์ได้ อย่างไรก็ตามการใช้งานนาโนซิลิกาและนาโนอะลูมินาเป็นสารผสมเพิ่มร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก มีแนวโน้มลดลง

4.3 โครงสร้างทางจุลภาคของไฮบริดซีเมนต์ที่มีการใช้นาโนซิลิกาและนาโนอะลูมินาเป็นสารผสมเพิ่มมีแนวโน้มความแน่นของเพสต์มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ของไฮบริดซีเมนต์ที่พบความเป็นออสติฐานมากขึ้นในช่วงมุม 25-35

4.4 กำลังรับแรงเฉือนอัดระหว่างคอนกรีตเดิมกับไฮบริดซีเมนต์ที่มีการใช้นาโนซิลิกาและนาโนอะลูมินาเป็นสารผสมเพิ่มร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก มีความเหมาะสมต่อการพัฒนากำลังรับแรงเฉือนอัด แต่อย่างไรก็ตามการใช้งานนาโนซิลิกาและนาโนอะลูมินาเป็นสารผสมเพิ่มร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก มีแนวโน้มลดลงเช่นเดียวกับผลการทดสอบกำลังอัดและกำลังดัดของไฮบริดซีเมนต์

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณทุนสนับสนุนจากงบรายได้ประจำปีงบประมาณ 2559 ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี นครราชสีมา

#### 6. เอกสารอ้างอิง

[1] B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave and L.A. Meyer, "Climate change 2007," *Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*,

*Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA*, pp. 447-496, 2007.

- [2] F. Pacheco-Torgal, J. Castro-Gomes and S. Jalali, "Alkali-activated binders: A review. Part 1. Historical background, terminology, reaction mechanisms and hydration products," *Construction and Building Materials*, vol. 22, pp. 1305-1314, 2008.
- [3] P. Chindaprasirt, T. Chareerat and V. Sirivivatnanon, "Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymer," *Cement and Concrete Composites*, vol. 29, pp. 224-229, 2007.
- [4] S. Pangdaeng, T. Phoo-ngernkham, V. Sata and P. Chindaprasirt, "Influence of curing conditions on properties of high calcium fly ash geopolymer containing Portland cement as additive," *Materials & Design*, vol. 53, 269-274, 2014.
- [5] H.M. Khater, B.A. El-Sabbagh, M. Fanny, M. Ezzat and M. Lottfy, "Effect of nano-silica on alkali activated water cooled slag geopolymer," *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 2, pp. 170-176, 2012.
- [6] ASTM C618-15, "Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete," *Annual Book of ASTM Standard*, vol.04.02, 2015.
- [7] TIS. 2135-2545, "Coal fly ash for use as an admixture in concrete," Thai Industrial Standards Institute, 2006.
- [8] ASTM C191-13, "Standard test method for time of setting of hydraulic cement by vicat needle," *Annual Book of ASTM Standard*, vol. 04.01, 2013.

- [9] ASTM C109, "Standard test method of compressive strength of hydraulic cement mortars (using 2-in. or [50 mm] cube specimens)," *Annual Book of ASTM Standard*, vol. 04.01, 2002.
- [10] ASTM C293-02, "Flexural strength of concrete (using simple beam with center-point loading)," *Annual Book of ASTM Standard*, vol. 04.02, 2002.
- [11] ACI 211.1-91, "Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight, and mass concrete," *American Concrete Institute*, 1991.
- [12] FM 3-C 882, "Florida Test Method for Performance of epoxy-resin systems with concrete by slant shear and compressive strength," in *Florida Department of Transportation Standard Specifications for Road and Bridge Construction*, July, 2015.
- [13] K.E. Hassan, P.C. Robery and L. Al-Alawi, "Effect of hot-dry curing environment on the intrinsic properties of repair materials," *Cement and Concrete Composites*, vol. 22, pp. 453-458, 2000.
- [14] T. Phoo-ngernkham, P. Chindapasirt, V. Sata, S. Hanjitsuwan and S. Hatanaka, "The effect of adding nano-SiO<sub>2</sub> and nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on properties of high calcium fly ash geopolymer cured at ambient temperature," *Materials & Design*, vol. 55, pp. 58-65, 2014.
- [15] T. Phoo-ngernkham, S. Hanjitsuwan, N. Damrongwiriyanupap and P. Chindapasirt, "Effect of sodium hydroxide and sodium silicate solutions on strengths of alkali activated high calcium fly ash containing Portland cement," *KSCE Journal of Civil Engineering*, In Press, 2016.
- [16] T. Phoo-ngernkham, V. Sata, S. Hanjitsuwan, C. Ridditirud, S. Hatanaka and P. Chindapasirt, "High calcium fly ash geopolymer mortar containing Portland cement for use as repair material," *Construction and Building Materials*, vol. 98, pp. 482-488, 2015.
- [17] P. Chindapasirt, P. De Silva, K. Sagoe-Crenstil and S. Hanjitsuwan, "Effect of SiO<sub>2</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on the setting and hardening of high calcium fly ash-based geopolymer systems," *Journal of Materials Science*, vol. 47, pp. 4876-4883, 2012.
- [18] I. Lecomte, C. Henrist, M. Liegeois, F. Maseri, A. Rulmont and R. Cloots, "(Micro)-structural comparison between geopolymers, alkali-activated slag cement and Portland cement," *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 26, pp. 3789-3797, 2006.
- [19] K. Somna, C. Jaturapitakkul, P. Kajitvichyanukul and P. Chindapasirt, "NaOH-activated ground fly ash geopolymer cured at ambient temperature," *Fuel*, vol. 90, pp. 2118-2124, 2011.
- [20] F. Pacheco-Torgal, J.P. Castro-Gomes and S. Jalali, "Adhesion characterization of tungsten mine waste geopolymeric binder. Influence of OPC concrete substrate surface treatment," *Construction and Building Materials*, vol. 22 pp. 154-161, 2008.